

КАЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Комарь Е.В.

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г.Томск

Ключевые слова: математическое моделирование, гетерофазные материалы с некогерентными частицами, дислокации, деформационная дефектная подсистема

Аннотация. В работе представлены результаты качественного исследования математической модели пластической деформации гетерофазных сплавов с некогерентными частицами, включающей два типа дефектов (сдвигообразующие дислокации и призматические петли). Показано, что для эволюции дислокационной подсистемы наблюдается два стационарных состояния – устойчивое и неустойчивое. Построены фазовые портреты дефектной подсистемы.

QUALITATIVE STUDY OF THE EVOLUTION OF THE DISLOCATION SUBSYSTEM OF DISPERSED-HARDENED MATERIALS

Komar E.V.

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk

Keywords: mathematical modeling, heterophase materials with incoherent particles, dislocations, deformation defect subsystem.

Abstract. The paper presents the results of a qualitative study of a mathematical model of plastic deformation of heterophase alloys with incoherent particles, including two types of defects (shear-forming dislocations and prismatic loops). It is shown that for the evolution of the dislocation subsystem, two stationary states are observed - stable and unstable. Phase portraits of the defective subsystem are constructed.

При исследовании эволюции дислокационной подсистемы в кристаллических материалах математическое моделирование приобретает особое значение, поскольку многие процессы структурообразования происходят настолько быстро, что оказываются практически недоступными экспериментальным наблюдениям. При математическом моделировании удобно использовать дифференциальные уравнения баланса, которые позволяют применить аппарат теории устойчивости и методы качественного исследования динамических систем.

Ранее, в работе [1] были рассмотрены две модели, содержащие два уравнения баланса: 1) сдвигообразующие дислокации и призматические петли вакансионного типа; 2) сдвигобразующие дислокации и призматические петли межузельного типа. Показано наличие двух стационарных состояний, одно из которых устойчивое, второе неустойчивое, соответственно этому наличие двух областей развития дислокационной подсистемы (упрочнение и разупрочнение).

В данной работе для исследования возможных путей развития дефектной подсистемы в дисперсно-упрочненных материалах с некогерентной недеформируемой второй фазой рассмотрим математическую модель дислокационной подсистемы, которая включает два уравнения баланса:

сдвигообразующих дислокаций и призматических дислокационных петель, не разделяя их на вакансионные и межузельные [1, 2].

$$\frac{d\rho_m}{da} = \frac{FP_j \xi <\Delta E_k>}{8\tau_{dyn} b^3} \rho - \frac{16}{3} \frac{2}{\pi} \rho^{\frac{1}{2}} \frac{\rho_m}{\rho} \frac{\tau_{dyn} q}{Gb},$$

$$\frac{d\rho_p}{da} = \frac{<\chi> \delta}{\Lambda_p^2 b} - \frac{16}{3} \rho^{\frac{1}{2}} \frac{\rho_p}{\rho} \frac{\tau_{dyn} q}{Gb}.$$

Здесь a – деформация сдвига; ρ – суммарная плотность дислокаций; ρ_m – плотность сдвигообразующих дислокаций; ρ_p – плотности дислокаций, образующих призматические петли; F – безразмерный параметр, определяемый геометрией зоны сдвига; b – модуль вектора Бюргерса; G – модуль сдвига; τ_{dyn} – напряжение, избыточное над статическим сопротивлением движению дислокаций; $\xi \approx 0,5$ – фактор Смоллмена; $<\chi>$ – параметр, характеризующий геометрию дислокаций на частицах; Λ_p – расстояние между частицами; δ – диаметр частицы; P_j – доля порогаобразующих дислокаций леса [2].

Качественное исследование данной модели показало, что система уравнений баланса имеет два стационарных решения. На рисунке 1. представлены диаграммы стационарных решений в зависимости от значений различных параметров.

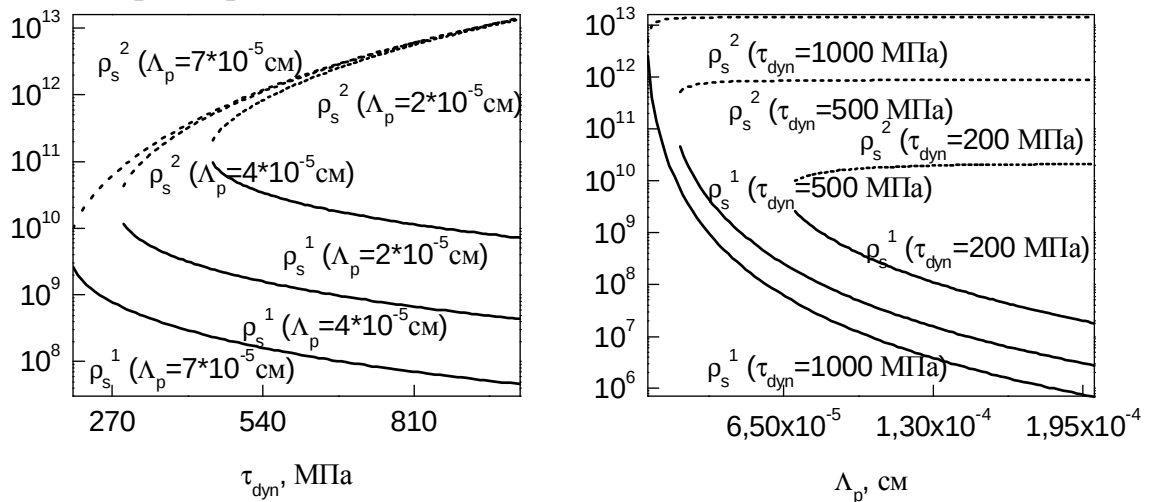


Рис. 1. Зависимость стационарных плотностей дислокаций от динамического напряжения и расстояния между частицами при $q=8$, $G=10^5$ МПа, $\delta=5 \cdot 10^{-6}$ см, где ρ_s^1 – устойчивое стационарное состояние («фокус» или «узел»), ρ_s^2 – неустойчивое («седло»)

Анализ типа устойчивости стационарных решений показал, что характеристические корни одного стационарного состояния являются действительными и различными (оба отрицательные), и, следовательно, это стационарное состояние – устойчивый «узел». Характеристические корни соответствующие другому стационарному состоянию действительные и различные (один – положительный, второй – отрицательный), следовательно, второе стационарное состояние является неустойчивым типа «седло». Фазовый портрет в пространстве (ρ_m, ρ_p) представлен на рисунке 2.

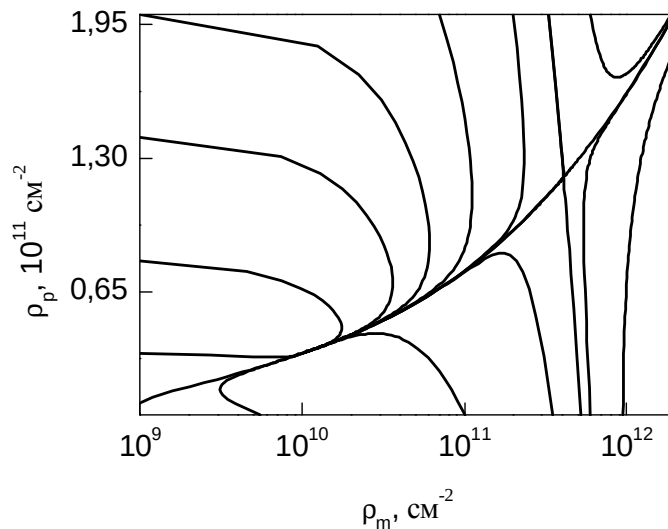


Рис. 2. Фазовое пространство (ρ_m, ρ_p) при $G=10^5$ МПа, $\delta=5 \cdot 10^{-6}$ см, $\tau_{dyn}=1000$ МПа, $A_p=7 \cdot 10^{-5}$ см (Ni)

Проведенное исследование данной модели и моделей в работе [1] показало, что эволюция дислокационной подсистемы гетерофазных сплавов, деформируемых в условия интенсивных воздействий, может иметь различный характер в зависимости от характеристик материала и исходной плотности дефектов. В фазовом пространстве переменных модели для физически реальных значений параметров практически всегда существуют две стационарные точки; одна из которых неустойчивая (типа седло), вторая устойчивая типа узел или фокус). Следовательно, можно выделить три области с различным поведением дислокационной подсистемы: 1) область, в которой плотность дислокаций возрастает, приближаясь к стационарному значению; 2) область, в которой плотность дислокаций уменьшается с деформацией, то есть наблюдается разупрочнение; 3) область неограниченного возрастания плотности дислокаций. Отметим, что область деформационного разупрочнения увеличивается при увеличении избыточного напряжения τ_{dyn} и расстояния между частицами (рис. 1). В этих условиях деформация будет иметь сильно локализованный характер; область деформационного разупрочнения является областью локализации деформации.

Список литературы

1. Комарь Е.В., Колупаева С.Н. Исследование эволюции дефектной подсистемы дисперсно-упрочненных материалов // Фундаментальные основы механики. 2019. №4. С. 188-190.
2. Ковалевская Т.А., Виноградова И.В., Попов Л.Е. Математическое моделирование пластической деформации гетерофазных сплавов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1992. 167 с.
3. Колупаева С.Н., Ерыгина Е.В., Ковалевская Т.А., Попов Л.Е. Качественное исследование эволюции дефектной подсистемы гетерофазных сплавов с некогерентной упрочняющей фазой при интенсивных воздействиях // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. Вып. 2. С.63-79.

Сведения об авторе:

Комарь Елена Васильевна – к.ф.-м.н., доцент, ТГАСУ, Томск.